

КИМ ЕН ДАР, д-р.техн.наук, проф., УИПА, Харьков;
В.Н.ТАРАН, инженер, ГП «НИИВН», Славянск

ОБОСНОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО БРАКОВОЧНОГО УРОВНЯ $\operatorname{tg}\delta$ ДЛЯ ТАРЕЛЬЧАТЫХ ФАРФОРОВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ

Показана корреляционная зависимость между уровнем дефектных изоляторов в эксплуатации и распределением величины $\operatorname{tg}\delta$ изоляторов. Представлены критерии определения оптимального уровня $\operatorname{tg}\delta$ для браковки дефектных изоляторов. Приведен алгоритм оценивания состояния изоляторов в эксплуатации.

Показано кореляційну залежність між рівнем дефектних ізоляторів в експлуатації та розподілом величини $\operatorname{tg}\delta$ ізоляторів. Надані критерії визначення оптимального рівня $\operatorname{tg}\delta$ для бракування дефектних ізоляторів. Приведено алгоритм оцінювання стану ізоляторів в експлуатації.

Has been shown correlation between failure insulators' layer and quantity of $\operatorname{tg}\delta$ for insulators distribution. Have been reduced $\operatorname{tg}\delta$ optimal layer criteria for failure insulators rejection. Has been given assessment algorithm for insulators' state during the usage.

Согласно «Правилам технического обслуживания и ремонта контактной сети электрифицированных железных дорог» в контактной сети тарельчатые фарфоровые изоляторы подвергаются сплошному контролю с установленной периодичностью [1]. Контроль заключается во внешнем осмотре изоляторов и выявлении нулевых изоляторов различными способами. Обследование демонтированных изоляторов и их лабораторные исследования показывают, что основным фактором ухудшения фарфоровых изоляторов является механическое воздействие, которому они подвергаются в процессе эксплуатации [2]. При этом конечным исходом потери работоспособности этих изоляторов является потеря электрической прочности, а не механическое разрушение. В тоже время «зануление» изоляторов практически не оказывает влияние на их механическую прочность, что подтверждается многолетней практикой проведения электро-механических испытаний. Таким образом, надежность работы сети определяется практически внутренней электрической прочностью изоляторов, а не их механической прочностью, и отказы сети обуславливаются электрическим отказом всех последовательно соединенных изоляторов в гирлянде.

В свою очередь, была выявлена тесная корреляционная связь между электрическим состоянием изоляторов и величиной тангенса угла диэлектрических потерь ($\operatorname{tg}\delta$). Установлено, что для фарфоровых изоляторов, удовлетворяющих техническим требованиям, значения $\operatorname{tg}\delta$ лежат в диа-

пазоне 0,015-0,030. Однако под действием долговременных внешних нагрузок исходное распределение подвергается деформации в сторону больших значений, что свидетельствует о появлении электрически ослабленных изоляторов в процессе эксплуатации.

Сравнение методов контроля изоляторов показали высокую эффективность дефектировки изоляторов по величине $\operatorname{tg}\delta$ по сравнению с применяемой на практике методикой их отбраковки с помощью мегомметра или измерительной штанги [2, 3]. При неразрушающем способе диагностики, к которому относится отбраковка изоляторов путем измерения $\operatorname{tg}\delta$, всегда существует риск отбраковки кондиционных (пригодных к эксплуатации) изделий и риск «недоотбраковки» дефектных изоляторов.

На рис. 1 приведены две функции распределения величины $\operatorname{tg}\delta$, подчиняющиеся закону Вейбулла. Они построены по результатам измерений и испытаний изоляторов, демонтированных с контактных сетей различных железных дорог стран СНГ [3]. Восходящая функция

$$F_1 = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\operatorname{tg}\delta}{a_1}\right)^{b_1}\right] \quad (1)$$

представляет собой функцию ошибки «недоотбраковки» дефектных изоляторов, если отбраковка проводилась бы при принятой величине $\operatorname{tg}\delta$ и $\operatorname{tg}\delta$ изоляторов распределен равномерно (где $a_1=0,21$; $b_1=1,3$). Другими словами данная функция отображает вероятность попадания в эксплуатацию дефектных изоляторов в зависимости от величины браковочного уровня $\operatorname{tg}\delta$.

Нисходящая функция F_2

$$F_2 = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\operatorname{tg}\delta}{a_2}\right)^{b_2}\right] \quad (2)$$

с параметрами распределения: $a_2=0,01$; $b_2=0,5$ устанавливает вероятность того, что после отбраковки изоляторов по величине $\operatorname{tg}\delta$ среди отбракованных окажутся годные изоляторы. Поэтому F_2 принимаем как функцию ошибки «переотбраковки».

Наличие этих двух функций позволяет прогнозировать уровни ошибок недоотбраковки и переотбраковки предлагаемой методики для принятого браковочного уровня величины $\operatorname{tg}\delta$. Например, как можно видеть из рис. 1, для $\operatorname{tg}\delta=0,05$ имеем $F_1=0,14$, $F_2=0,1$.

Если отсутствуют особые требования к рассматриваемому объекту-участку линии и полагается равная весомость ошибок F_1 и F_2 , то в первом приближении оптимальному браковочному уровню $\operatorname{tg}\delta_{\text{оп}}$ будет соответствовать условие минимума суммы ошибок предложенной методики, т. е:

$$F_1 + F_2 = \min. \quad (3)$$

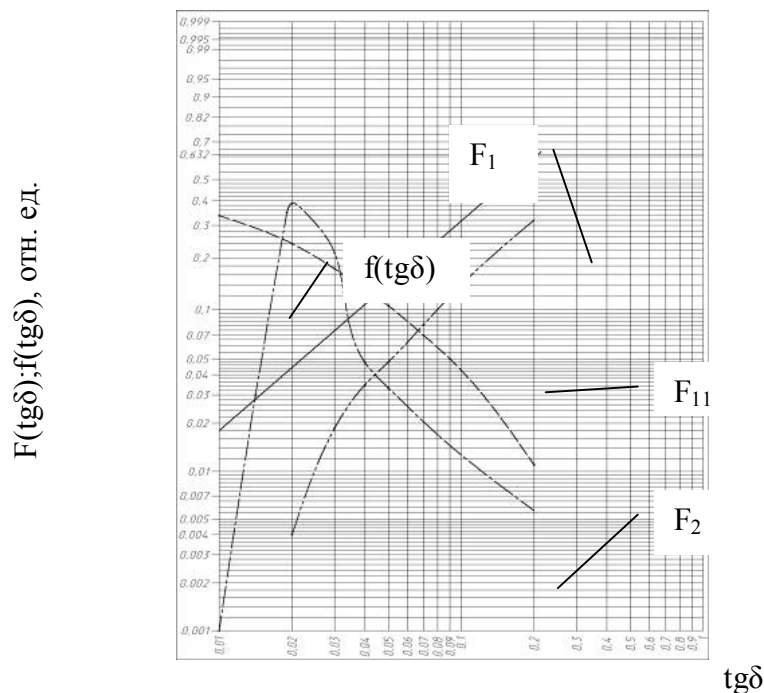


Рис.1 – Функции распределения величины $tg\delta$

Для определения искомого браковочного параметра дифференцируем F по x и приравниваем полученное выражение нулю. Получаем:

$$\frac{b_1}{a_1} \left(\frac{tg\delta_{on}}{a_1} \right)^{b_1-1} \exp\left[-\left(\frac{tg\delta_{on}}{a_1}\right)^{b_1}\right] - \frac{b_2}{a_2} \left(\frac{tg\delta_{on}}{a_2} \right)^{b_2-1} \exp\left[-\left(\frac{tg\delta_{on}}{a_2}\right)^{b_2}\right] = 0. \quad (4)$$

Соотношение (4) можно преобразовать к следующему трансцендентному уравнению.

$$tg\delta_{on} = \left\{ \frac{a_1^{b_1}}{a_2^{b_2}} \frac{b_2}{b_1} \exp\left[\left(\frac{tg\delta_{on}}{a_1}\right)^{b_1}\right] - \left(\frac{tg\delta_{on}}{a_2}\right)^{b_2} \right\}^{\frac{1}{b_1-b_2}}. \quad (5)$$

Подставляя параметры распределения в (5), методом последовательного приближения находим искомую величину $tg\delta_{on} \cong 0,04$.

Для полученного значения из (1) и (2) при условии равномерного распределения величины $tg\delta$ имеем:

$F_1 = 0,11$ - вероятность неотбраковки дефектных изоляторов;

$F_1 = 0,13$ - вероятность отбраковки кондиционных изоляторов.

Вследствие большого объема использованной выборки при выводе исходных функций (1) и (2), они будут правомерны для однотипных фарфоровых изоляторов тарельчатой конструкции. Поэтому для того, чтобы определить реальный уровень электрически ослабленных изоляторов аналогичного типа на заданном участке линии, достаточно знать распределение изоляторов по $tg\delta$ на этом участке. Если такое распределение f известно, то вероятность недоотбраковки дефектных изоляторов по величине $tg\delta$ для выбранного участка, что равнозначно, состояние изоляции, можно оценивать путем интегрирования произведения этого распределения на вероятность F_1 . С этой целью воспользуемся интегралом свертки:

$$F_{11} = \int_{x_0}^x \left[f(x_0)F_1(x) + \int_{x_0}^x F_1(x-z)df(Z) \right] dx, \quad (6)$$

где x, z – текущие значения $tg\delta \in (tg\delta_0; tg\delta)$; $f(x_0)$ - плотность распределения для минимального измеренного значения $tg\delta_0$.

Для того чтобы на практике решать задачи определения состояния изоляции на том или ином участке линии на основе соотношения (6) следует:

1. Составить матрицу расчета уровня дефектных изоляторов на основе (6), которую несложно реализовать на ПК.

$tg\delta$	x_0	x_1	x_2	x_3	x_k
	$f(x_0)F_1(x_0)$	$f(x_0)F_1(x_1)$	$f(x_0)F_1(x_2)$	$f(x_0)F_1(x_3)$	$f(x_0)F_1(x_k)$
		$\Delta f(x_1)F_1(x_0)$	$\Delta f(x_1)F_1(x_1)$	$\Delta f(x_1)F_1(x_2)$	$\Delta f(x_0)F_1(x_1)$
			$\Delta f(x_2)F_1(x_1)$	$\Delta f(x_2)F_1(x_1)$	$\Delta f(x_2)F_1(x_2)$
				$\Delta f(x_3)F_1(x_0)$	$\Delta f(x_3)F_1(x_{k3})$
					$\Delta f(x_k)F_1(x_0)$
$\sum_{i=0}^k \downarrow$	$\sum_{i=0}^k \downarrow$	$\sum_{i=0}^k \downarrow$	$\sum_{i=0}^k \downarrow$	$\sum_{i=0}^k \downarrow$	$\sum_{i=0}^k \downarrow$
$\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \downarrow$	$\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \downarrow$	$\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \downarrow$	$\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \downarrow$	$\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \downarrow$	$\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^k \downarrow$

2. Произвести демонтаж не менее чем 50шт изоляторов с различных точек линии ($N \geq 50$).

3. Определить электронным мостом на частоте 1000Гц значения $tg\delta$ каждого изолятора и установить число n_i изоляторов в каждом заданном диапазоне $tg\delta = (x_i \pm 0,005)$ с шагом $tg\delta = 0,01$. В этом случае имеем: $X_i = i \times 0,01$.

4. Найти долю этих изоляторов в общем объеме демонтированных изоляторов и соответствующие численные значения для заполнения расчетной матрицы:

$$\tilde{f}(x_0) = \frac{n_0(x_0 \pm 0,005)}{N}; \quad \Delta f(x_1) = \frac{n_1(x_2 \pm 0,005) - n_0(x_0 \pm 0,005)}{N};$$

$$\Delta f(x_2) = \frac{n_2(x_2 \pm 0,005) - n_1(x_1 \pm 0,005)}{N}, \text{ и так далее.}$$

5. Вычислить второй множитель F_1 по формуле (1) для требуемых значений аргумента x_i .

6. Выполнив суммирование значений каждого столбца, получаем долю дефектных изоляторов в зависимости от $x = tg\delta$.

7. Выполнив суммирование предыдущей строки, получаем суммарный уровень дефектных изоляторов на линии по нарастанию переменной $x = tg\delta$.

На рис.1 (кривая $f(tg\delta)$) приведена плотность распределения $tg\delta$ изоляторов, находившихся в эксплуатации в контактной сети более 20 лет. Там же дана функция F_{11} , полученная численным интегрированием (6) и представляет собой суммарный прогнозируемый уровень наличия дефектных изоляторов на рассматриваемом участке в заданном интервале $tg\delta$.

Как можно видеть из рис.1, функция ошибки недоотбраковки дефектных изоляторов F_{11} , учитывающая фактическое распределение изоляторов по величине $tg\delta$ также удовлетворительно подчиняется распределению Вейбулла с параметрами: $a=0,45, b=1,4$.

Воспользовавшись критерием (3), находим с помощью соотношения (5) оптимальное браковочное значение, при котором имеет место минимум ошибки отбраковки негодных изоляторов на рассматриваемой линии:

$$tg\delta_{on} \approx 0,08 \quad (8)$$

Этому значению соответствуют:

$F_{11} = 0.10$ - вероятность того, что на линии останутся дефектные изоляторы после отбраковки согласно (8); $F_2 = 0.018$ - наибольшая вероятность отбраковки кондиционных изоляторов по параметру (8).

Обоснованность диагностики фарфоровых изоляторов посредством измерения $tg\delta$ по величине (8) иллюстрирует корреляция между реальным уровнем дефектных изоляторов V_n по электрической прочности и количеством изоляторов с $tg\delta \geq 0,08, V_{tg}$ [4]. На рис.2 приведены ре-

зультаты обследований изоляторов, демонтированных из 10-ти различных дорог с разными сроками эксплуатации. Объем рассмотренных изоляторов составил от 20 до 150шт для каждой зачетной точки на графике рис.2.

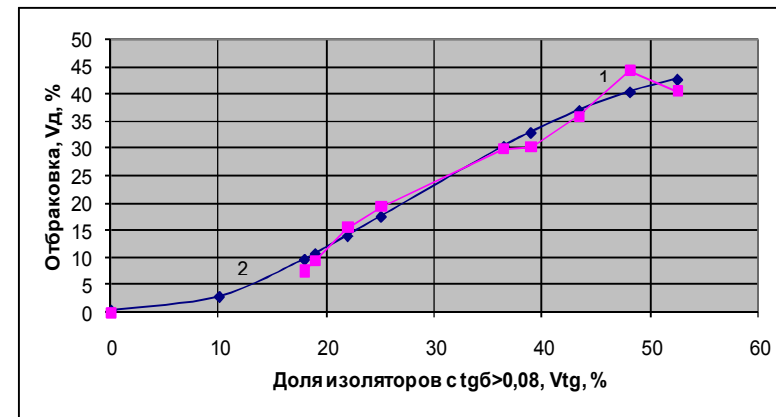


Рис. 2 – Соотношение между уровнем дефектных изоляторов ПФ70В и объемом изоляторов с критической величиной $tg\delta_{on} = 0,08$
1- данные опыта эксплуатации; 2- аппроксимирующая функция

Аппроксимирующая зависимость на рис.2 имеет вид

$$V_n = 0.01(-0.502 + 23.6V_{tg} + 19V_{tg}^2), \quad (9)$$

где V_n и V_{tg} в относительных единицах.

Таким образом, если известна доля изоляторов с $tg\delta \geq 0,08$, то по выражению (9) можно определить объем прогнозируемых дефектных изоляторов. Ошибка такого прогноза оценить значением $F_{11}(x = 0.08)$.

Выводы. Уровень дефектности фарфоровых изоляторов тарельчатой конструкции определяется величиной $tg\delta$, в свою очередь, распределение изоляторов по $tg\delta$ подчиняется закону Вейбулла. На основе этих положений получены соотношения для оценки состояния изоляции в сети, выбора оптимального браковочного значения $tg\delta$ ослабленных изоляторов и оценки допускаемых ошибок принятия соответствующих решений.

Список литературы: 1. ДСТУ 2203-93 (ГОСТ 6490-93) Ізолятори лінійні підвісні тарічасті. Загальні технічні умови; 2. Ким Ен Дар Методика прогнозування показателів надійності підвесних лінійних ізоляторів / Ким Ен Дар, В.Н. Таран // Вестник ХГПУ. – 1999. – Выпуск 69. 3. Ким Ен Дар Состояние фарфоровых изоляторов и методы их контроля. // Вестник ХГПУ. - 1998. - Выпуск 13. 4. Ким Ен Дар Методика оценки остаточного ресурса тарельчатых фарфоровых изоляторов. / Ким Ен Дар, В.Н. Таран, Сыченко В.Г. // Вісник Дніпропетровського національного технічного університету залізничного транспорту ім. ак. В. Лазаряна. – 2008. – Вип. 24. – С.61-66.

Поступила в редколлегию 03.11.2010